

Title	原子数射影分光法によるボース・ハバードエネルギーの実験的決定(Abstract_要旨)
Author(s)	中村, 悠介
Citation	Kyoto University (京都大学)
Issue Date	2019-05-23
URL	https://doi.org/10.14989/doctor.k21947
Right	
Type	Thesis or Dissertation
Textversion	ETD

京都大学	博 士（理 学）	氏名	中村悠介
論文題目	原子数射影分光法によるボース・ハバードエネルギーの実験的決定		
(論文内容の要旨)			
<p>近年、中性原子のレーザー冷却技術が開発され、マイクロケルビン台の極低温の原子集団を用意することが可能になり、物性、量子情報、原子時計、その他様々な研究に用いられている。さらに、ボース・アインシュタイン凝縮体やフェルミ縮退などの量子気体が生成され、その物性研究が盛んに研究されている。さらに、量子気体を、光格子と呼ばれるレーザー光の定在波によってつくられた周期的なポテンシャルに導入した系は、固体中の電子系とのアナロジーから、強相関量子多体系を研究する新しい実験系として注目を集め、盛んに研究されている。特に、不純物や格子欠陥のない、理想的な系を対象とすることができることや、系のパラメーターを高い精度で制御可能であることが大きな特徴であり、このようなことから、光格子中の冷却原子を用いた実験は、量子多体系に対する量子シミュレーション実験と認識されている。</p> <p>このような背景のもと、本論文の研究では、まず、原子種としてボース粒子であるイッテルビウム (^{174}Yb) 原子を用いて、調和型の弱い閉じ込めポテンシャル中にボース・アインシュタイン凝縮体を生成し、それを様々な深さの3次元光格子に導入することにより理想的にボース・ハバードモデルに従う系をまず用意した。このボース・ハバードモデルは隣接サイト間のホッピングに起因する運動エネルギー項と、多重占有サイトにおけるオンサイト相互作用に起因する相互作用項からなる。このボース・ハバードモデルの系に対して、運動エネルギーに対しては、光格子ポテンシャルを急峻に立ち下げ、その後にある時間、自由に運動させた後の原子集団の空間分布を測定する「飛行時間信号」について、新たにそれをフーリエ変換することで運動エネルギーを得るという新しい解析法を開発し、これを、様々な初期原子温度、様々な光格子深さ、で系統的に測定を行い、有限温度の弱相関から強相関にいたる様々な領域で運動エネルギーを決定することに成功した。さらに、相互作用エネルギーについても、光格子ポテンシャルを急峻に深くして、そこでイッテルビウム原子に特有な狭線幅光学遷移を利用した超高分解能レーザー分光を行う、「原子数射影分光法」を新たに開発して、これを、やはり、様々な初期原子温度、様々な光格子深さ、で系統的に測定を行い、有限温度の弱相関から強相関にいたる様々な領域で相互作用エネルギーを決定することに成功した。</p> <p>このハバードエネルギーの決定においては、「飛行時間信号」における、有限の飛行時間の効果、多重占有の相互作用の効果、を慎重に見積り、これを補正することで、信頼性の高い測定を行った。また、「原子数射影分光法」においても、多重占有サイトの励起状態の緩和の効果、原子間相互作用によるワニア関数の広がり効果、を慎重に見積り、これを補正することで、信頼性の高い測定を行った。</p> <p>以上で実験的に決定したハバード・エネルギーの値を、最新の理論である、グッツウィラー法、およびそれを改良したクラスター・グッツウィラー法による計算と比較し、ほとんどすべての温度領域で、弱相関から強相関におよぶ範囲で、クラスター・グッツウィラー法による数値計算と実験データが非常によく一致することを確認することに成功した。</p> <p>これらの成果は、どれも世界で初めての重要な成果であり、光格子中の冷却原子を用いた量子シミュレーション研究を大きく前進させたと言える。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

近年、中性原子のレーザー冷却技術が開発され、マイクロケルビン台の極低温の原子集団を用意することが可能になり、物性、量子情報、原子時計、その他様々な研究に用いられている。さらに、ボース・アインシュタイン凝縮体やフェルミ縮退などの量子気体が生成され、その物性研究が盛んに研究されている。さらに、量子気体を、光格子と呼ばれるレーザー光の定在波によってつくられた周期的なポテンシャルに導入した系は、固体中の電子系とのアナロジーから、強相関量子多体系を研究する新しい実験系として注目を集め、盛んに研究されている。特に、不純物や格子欠陥のない、理想的な系を対象とすることができることや、系のパラメータを高い精度で制御可能であることが大きな特徴であり、このようなことから、光格子中の冷却原子を用いた実験は、量子多体系に対する量子シミュレーション実験と認識されている。

このような背景のもと、本論文の研究では、まず、原子種としてボース粒子であるイッテルビウム (^{174}Yb) 原子を用いて、調和型の弱い閉じ込めポテンシャル中にボース・アインシュタイン凝縮体を生成し、それを様々な深さの3次元光格子に導入することにより理想的にボース・ハバードモデルに従う系をまず用意した。このボース・ハバードモデルは隣接サイト間のホッピングに起因する運動エネルギー項と、多重占有サイトにおけるオンサイト相互作用に起因する相互作用項からなる。このボース・ハバードモデルの系に対して、運動エネルギーに対しては、光格子ポテンシャルを急峻に立ち下げ、その後にある時間、自由に運動させた後の原子集団の空間分布を測定する「飛行時間信号」について、新たにそれをフーリエ変換することで運動エネルギーを得るという新しい解析法を開発し、これを、様々な初期原子温度、様々な光格子深さ、で系統的に測定を行い、有限温度の弱相関から強相関にいたる様々な領域で運動エネルギーを決定することに成功した。さらに、相互作用エネルギーについても、光格子ポテンシャルを急峻に深くして、そこでイッテルビウム原子に特有な狭線幅光学遷移を利用した超高分解能レーザー分光を行う、「原子数射影分光法」を新たに開発して、これを、やはり、様々な初期原子温度、様々な光格子深さ、で系統的に測定を行い、有限温度の弱相関から強相関にいたる様々な領域で相互作用エネルギーを決定することに成功した。

このハバードエネルギーの決定においては、「飛行時間信号」における、有限の飛行時間の効果、多重占有の相互作用の効果、を慎重に見積り、これを補正することで、信頼性の高い測定を行った。また、「原子数射影分光法」においても、多重占有サイトの励起状態の緩和の効果、原子間相互作用によるワニア関数の広がり効果、を慎重に見積り、これを補正することで、信頼性の高い測定を行った。

以上で実験的に決定したハバード・エネルギーの値を、最新の理論である、グッツウィラー法、およびそれを改良したクラスター・グッツウィラー法による計算と比較し、ほとんどすべての温度領域で、弱相関から強相関におよぶ範囲で、クラスター・グッツウィラー法による数値計算と実験データが非常によく一致することを確認することに成功した。

これらは、世界に先駆けたもので、すでに学術雑誌や国内・国際会議などを通して、国の内外を問わず脚光を浴びている。今後、光・原子物理学、量子情報処理、量子エレクトロニクス、など、多くの研究分野への貢献も多大であり、高く評価できる。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年3月4日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。